

Análisis espacio temporal del bofedal de la comunidad de Ancomarca (Tacna - Perú) durante el período 1990 – 2021, con técnicas de teledetección

Spatial-temporal analysis of the wetland of the Ancomarca community (Tacna - Peru) during the period 1990 - 2021, using remote sensing techniques

Johan Pamo-Sedano¹
Carlos E. Oscoco-Coa²

ORCID: 0000-0003-2425-9917
ORCID: 0000-0001-6439-6938

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal analizar el cambio del área de bofedal de la comunidad de Ancomarca, ocurrido entre 1990 y 2021, mediante técnicas de teledetección. La comunidad de Ancomarca se encuentra ubicada entre las coordenadas 17°32' 18.58" LS, y 69°34' 05.36" LW a una altitud de 4 194 msnm en el distrito de Palca, provincia y departamento de Tacna. Se utilizaron imágenes satelitales obtenidas de la plataforma USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos), descargadas de la página web <https://earthexplorer.usgs.gov/> para los años 1990, 2005 y 2021, y software ArcGis 10.2 y Erdas Imagine 2014 para el pre-procesamiento y procesamiento de las imágenes. Para determinar el estado actual del ecosistema de bofedal en la comunidad de Ancomarca, se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), estableciendo categorías del vigor de la vegetación del bofedal. Asimismo, se ha determinado la tasa anual de cambio de cobertura aplicando fórmulas de cálculo.

Los resultados obtenidos muestran disminución del área de bofedal desde el año 1990 hasta el año 2021, con un período de 31 años de evaluación; con 629.01 ha y 551.07 ha respectivamente, representando una disminución de 77.94 ha, con una tasa anual de cambio de -0.42%. La pérdida del área de bofedal podría estar vinculada a la sobreexplotación de aguas subterráneas, sobrepastoreo y al cambio climático.

Palabras clave: Ancomarca, bofedal, NDVI, tasa anual de cambio, teledetección

Abstract

The main objective of this research is to analyze the change in the wetland area of the Ancomarca community between 1990 and 2021, using remote sensing techniques. The community of Ancomarca is located between the coordinates 17°32' 18.58" LS, and 69°34' 05.36" LW at an altitude of 4 194 masl in the district of Palca, province and department of Tacna. Satellite images obtained from the USGS (United States Geological Survey) platform downloaded from the website <https://earthexplorer.usgs.gov/> for the years 1990, 2005 and 2021, and ArcGis 10.2 and Erdas Imagine 2014 software were used for image pre-processing and processing. To determine the current state of the wetland ecosystem in the Ancomarca

¹ Universidad Privada de Tacna. Departamento de Ingeniería Ambiental. Tacna, Perú. E-mail: johanpamosedano@gmail.com

² Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Escuela de Agronomía. Tacna, Perú. E-mail: cosccoc@unjbg.edu.pe

community, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was calculated, setting categories of the vigor of the wetland vegetation. Likewise, the annual rate of cover change was determined by applying calculation formulas. The results obtained show a decrease in the wetland area from 1990 to 2021, with a period of 31 years of evaluation; with 629.01 ha and 551.07 ha respectively, representing a decrease of 77.94 ha, with an annual variation rate of -0.42%. The loss of wetland area could be related to the overexploitation of groundwater, overgrazing and climate change.

Keywords: Ancomarca, wetland, NDVI, annual rate of change, remote sensing

Introducción

El bofedal es un ambiente altoandino presente sobre los 3 800 msnm, siempre inundado de agua con plantas herbáceas (MINAM, 2019). En el altiplano peruano boliviano hay bofedales que son pastizales importantes dentro de áreas semiáridas y áridas, proveen al ambiente una protección del suelo y que el ciclo del agua se regule. En estos ambientes la productividad y reservas de carbono son altas, proveen alimento para la crianza de camélidos sudamericanos (Zorogastúa-Cruz et al, 2012). Los bofedales constituyen un hábitat importante para un gran número de especies de animales nativos, así como para los campesinos del lugar (Ruthsatz, 2012); al ser retenida el agua en estos ambientes, se favorece el desarrollo de forraje y de la presencia de fuentes de agua para los animales, asimismo de áreas con mayor biodiversidad (Maldonado, 2014).

Los bofedales principalmente se encuentran en el sur y centro del país, ocupando un área de 544.562 ha (0.42 % de la superficie nacional) (MINAM, 2015). En la región Tacna, se les encuentra en la parte altoandina en Ticaco, Palca, Cairani, Tarata, Camilaca, Susapaya y Candarave, abarcando un área total de 12 822.020 ha (0.80 % del área regional) (GORET, 2016).

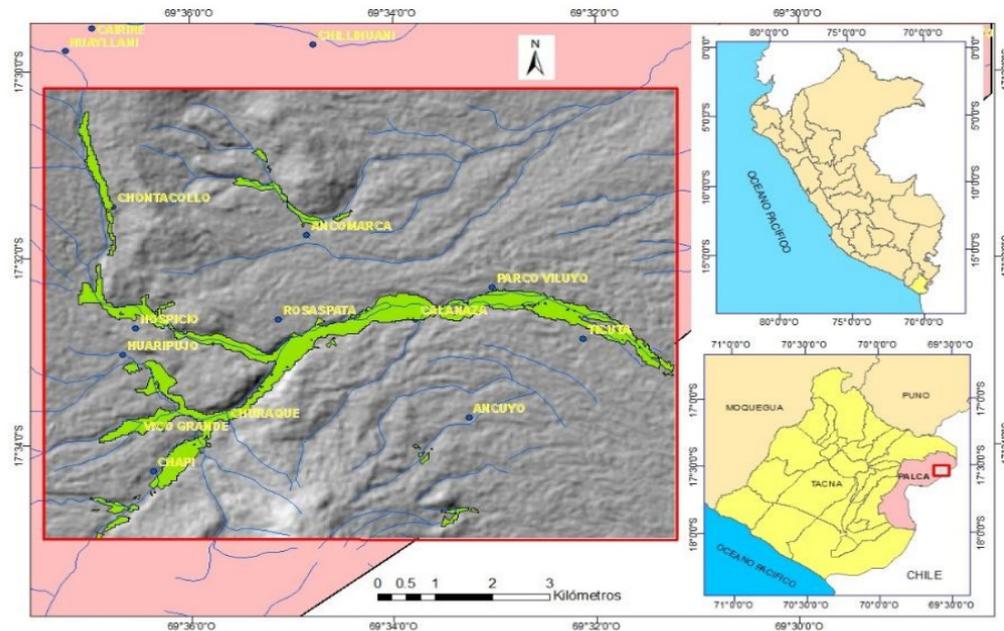
La teledetección desde hace décadas se utiliza como herramienta para obtener información sobre propiedades que hay en la materia, de manera indirecta, como respuesta a la firma espectral o radiación electromagnética (Chuvienco, 2002).

La capacidad del análisis del NDVI y de la teledetección son muy importantes en la ubicación, detección, cuantificación y evaluación espacial y multitemporal de áreas de bofedales en riesgo, asimismo que orienta en la decisión de emprendimiento de estrategias públicas (Campos *et al.*, 2018).

Materiales y métodos

Área de estudio

La investigación se realizó en los bofedales de la comunidad de Ancomarca, ubicada en la cabecera del distrito de Palca, provincia y departamento de Tacna, entre las coordenadas geográficas: Latitud 17°32' 18.58" S, Longitud 69°34' 05.36" O, a una altitud de 4 194 msnm. La comunidad de Ancomarca se encuentra limitado por los países de Perú, Bolivia y Chile, en una zona geográfica conocido popularmente como "Tripartito".

Figura 1*Ubicación del área de estudio***Determinación de zonas de muestreo**

Para la descripción del estado del bofedal se seleccionaron puntos de muestreo mediante recorridos a lo largo de la superficie del bofedal. Se aplicó el tipo de muestreo no aleatorio, discrecional con selección de zonas con ciertas características de vigor del bofedal, con apoyo de un equipo GPS (Sistema de Posicionamiento Global) e imágenes fotográficas. Cada punto o unidad de muestreo correspondió al área de entrenamiento de 90 x 90 m, para la extracción de firmas espectrales.

Obtención de imágenes satelitales

Se utilizó información satelital del programa Landsat (Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM y Landsat 8 OLI/TIRS) que se encuentra disponible en el servidor www.glovis.usgs.gov. Se realizó la descarga de imágenes satelitales de los años 1990, 2005 y 2021, con la siguiente denominación:

Tabla 1*Características de las imágenes satelitales*

Nombre de Imagen Landsat	Fecha	Path/Row	Fuente
LANDSAT/LT05_L1TP_002072_19901121_20170128_01_T1	21/11/1990	002/072	USGS
LANDSAT/LE07_L1TP_002072_20051021_20170113_01_T1	21/10/2005	002/072	USGS
LANDSAT/LC08_L1TP_002072_20211025_20211025_01_RT	25/10/2021	002/072	USGS

Tratamiento de imágenes satelitales

Con las imágenes satelitales descargadas, se procedió a realizar la reproyección y recorte de imágenes, el pre procesamiento (corrección radiométrica y corrección atmosférica) y procesamiento de imágenes, utilizando herramientas *software* como el ArcGis 10.2, y ERDAS Imagine 2014. La corrección radiométrica y atmosférica se realizó con el software ERDAS Imagine 2014, y la reproyección y recorte de imágenes se realizó con la herramienta ArcToolBox de ArcGis 10.2.

Cálculo del NDVI

El procesamiento de imágenes satelitales consistió en la generación del índice NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), para lo cual se utilizó el *software* ERDAS Imagine 2014 de acuerdo al siguiente detalle:

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada es un indicador del estado de la vegetación, calculado con el *software* ERDAS Imagine 2014, para cada año de estudio. Para las imágenes Landsat 05 y 07 se utilizaron las bandas 3 y 4 que corresponde al “rojo visible” e “infrarrojo cercano”, mientras que en las imágenes Landsat 08 se utilizaron las bandas 4 y 5 que corresponde al “rojo visible” e “infrarrojo cercano”.

Para la generación del NDVI se aplicó la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$$

Donde:

NIR : Valores de pixel de la banda infrarrojo cercano.

RED : Valores de pixel de la banda rojo.

Cálculo del área de bofedal

Para la determinación del área de bofedal en la zona de estudio, se realizó la reclasificación de valores utilizando la herramienta ArcToolBox de ArcGis 10.2 para los años 1990, 2005 y 2021. Aplicando la siguiente ecuación se determinó el área del bofedal

$$Area\ Has = \frac{(n^\circ\ de\ pixeles)(900)}{10000}$$

Donde:

n° de pixeles : corresponde al número de pixeles del área de bofedal

Cálculo de la tasa anual de cambio

Con los resultados obtenidos se procedió a calcular la tasa de cambio, aplicando la fórmula siguiente:

$$Tasa\ de\ cambio\ (\%) = \frac{\text{área de año } y \times 100}{\text{área de año } (x)} - 100$$

Donde:

Tasa de cambio : valores en porcentaje

Área de año (y) : área en el año posterior

Área de año (x) : área en el año anterior

El cálculo de la tasa anual de cambio se calcula con la siguiente fórmula:

$$TAC = \left[\frac{S_2}{S_1} \right]^{1/n} - 1 * 100$$

Donde:

- TAC* : tasa anual de cambio (en %)
S₁ : superficie en la fecha inicial
S₂ : superficie en la fecha final
n : diferencia de años entre fecha inicial y final

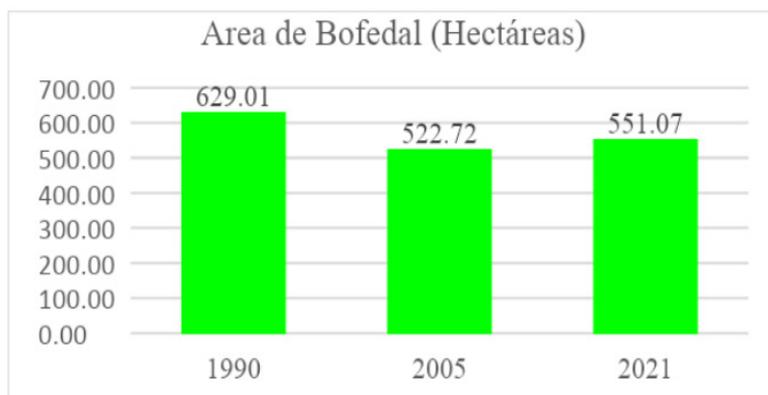
Resultados

Determinación del área de bofedal de la comunidad de Ancomarca

Se realizó el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para cada año establecido en el presente estudio, y mediante la reclasificación de valores, se generaron las imágenes que se muestran en la figura 3.

Figura 2

Área del Bofedal de Ancomarca, por períodos de tiempo

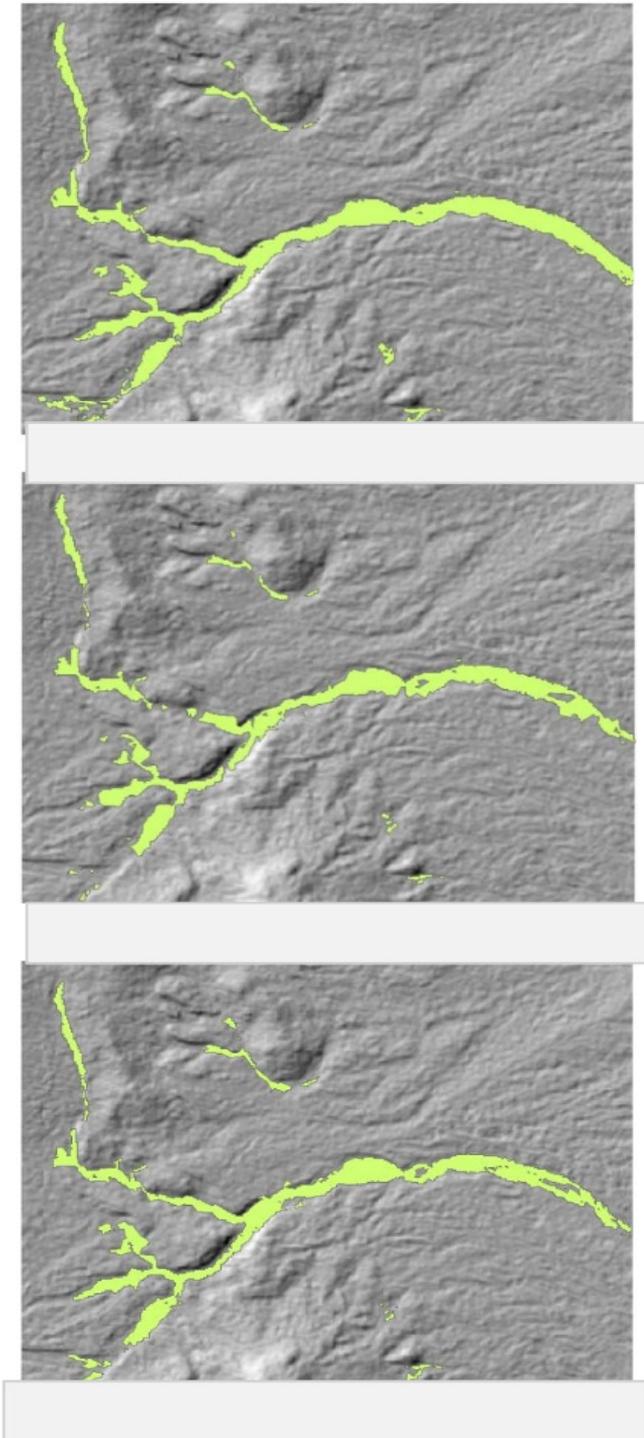


La figura 02 muestra el área de bofedal calculado para los años 1990, 2005 y 2021, utilizando las imágenes Landsat 05, 07 y 08 respectivamente. Se observa una disminución del área de bofedal en 77.94 hectáreas desde el año 1990 hasta el 2021, correspondiente a un período de 31 años, calculado a partir del número de píxeles con el *software* ArcGis 10.2.

En el primer período de evaluación (1990 al 2005), se observa una disminución del área de bofedal en 106.29 hectáreas, correspondiente a un período de 15 años. Luego, un incremento del área de bofedal en 28.35 hectáreas en el segundo período (2005 al 2021) correspondiente a un período de 16 años.

Figura 3

Variación de área del bofedal de Ancomarca



Nota. (a) 1990, (b) 2005, y (c) 2021

En la figura 03, se observa mayor número de fragmentos de vegetación de bofedal en la imagen del año 2005, y menor número de fragmentos en el año 1990; coincidiendo la fragmentación del bofedal, con el decrecimiento observado en la figura 02.

Caracterización del estado de vigor del bofedal de Ancomarca

La caracterización del estado de vigorosidad del bofedal se realizó mediante la reclasificación de imagen ráster de NDVI, utilizando el *software* ArcGis 10.2 para los años 1990, 2005 y 2021, de acuerdo al siguiente detalle:

Tabla 2

Categorías de vigorosidad del bofedal de Ancomarca

N°	Descripción	Color
1	Poca vegetación con baja vigorosidad	Rojo
2	Poca vegetación con vigorosidad media	Amarillo
3	Vegetación media con vigorosidad media	Verde claro
4	Vegetación densa con alta vigorosidad	Verde oscuro

Figura 4

Categorías de vigorosidad del bofedal, por períodos (1990, 2005 y 2021)

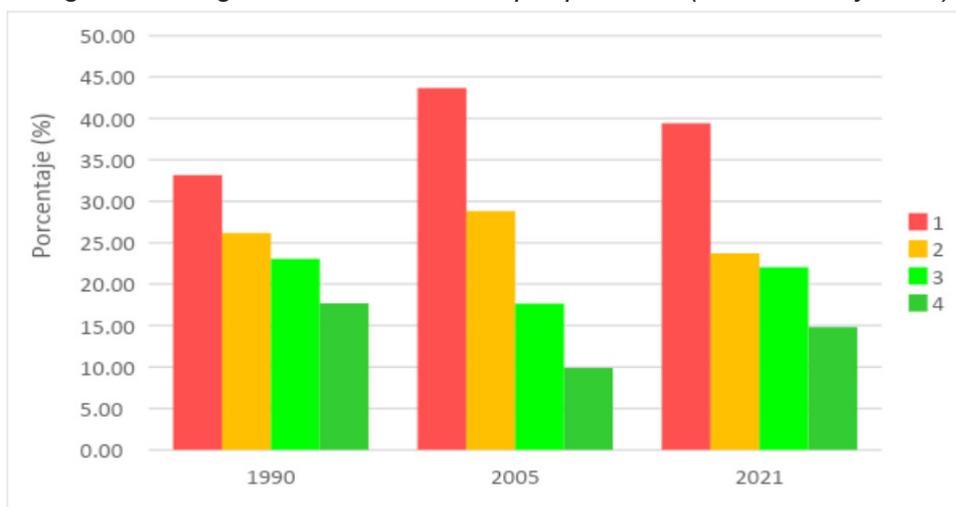
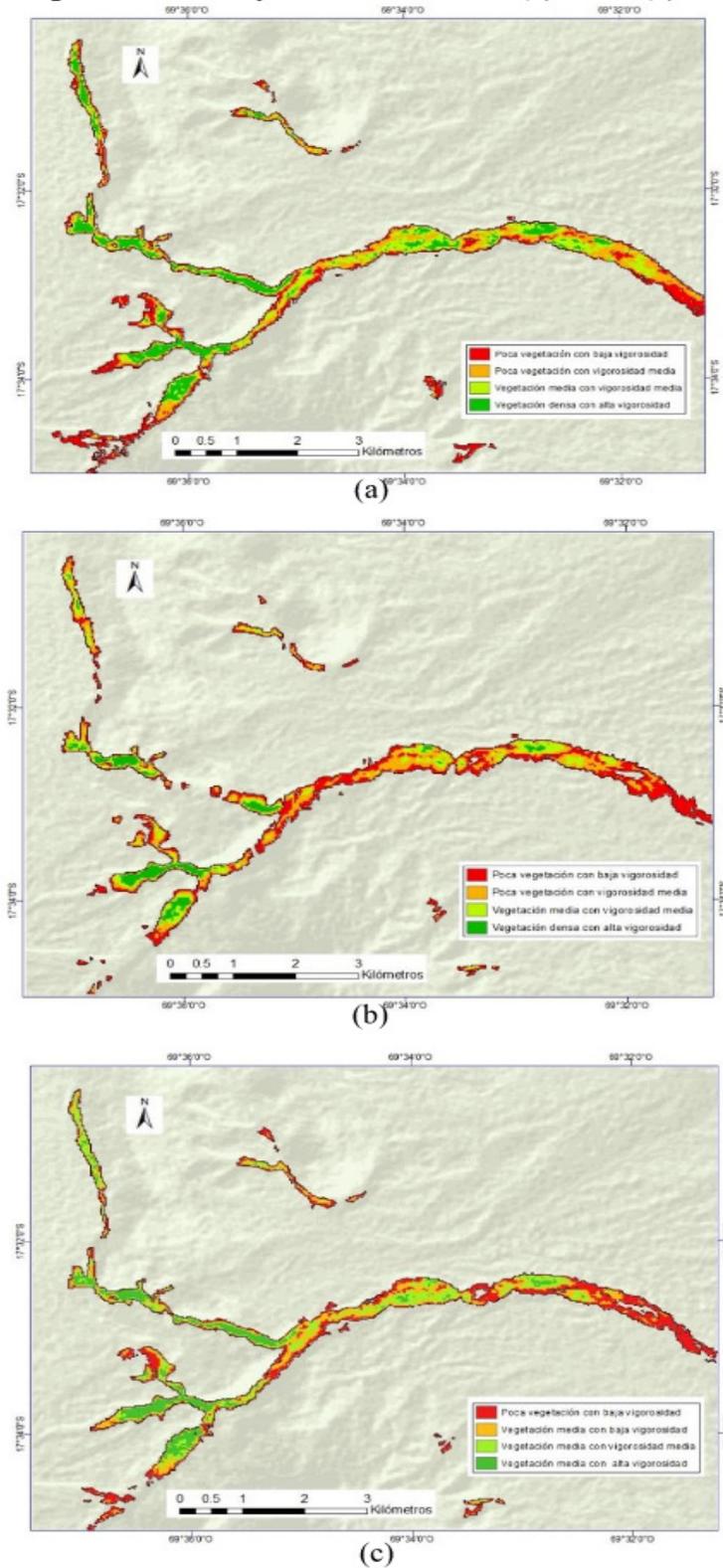


Figura 5

Vigorsidad del bofedal de Ancomarca (a) 1990, (b) 2005, y (c) 2021



En la figura 04 y 05, se puede observar que la categoría de “poca vegetación con baja vigorosidad” se mantiene con mayor porcentaje en el período evaluado, seguido de la categoría de “poca vegetación con vigorosidad media”. Las categorías “vegetación media con vigorosidad media” y “vegetación densa con alta vigorosidad” se mantienen con bajo porcentaje durante el período evaluado.

Determinación de la tasa de cambio del bofedal de Ancomarca

En la determinación de la tasa de cambio del bofedal, se aplicó la fórmula de cálculo obteniendo un valor de -12.39% que indica un decrecimiento de 77.94 ha del área de bofedal, observado entre los años de 1990 y 2021, con un período de evaluación de 31 años. Se observa, asimismo, un ligero incremento de 5.42 % en la tasa de cambio con 28.35 ha durante el segundo período de evaluación de 16 años, a partir del año 2005 al 2021. La tasa anual de cambio es de -0.42 % para el periodo de 1990 al 2021, y para el período de 2005 al 2021 una tasa anual de cambio de 0.33 %.

Discusión

Durante el lapso de evaluación del bofedal de la comunidad de Ancomarca, se ha determinado un cambio en la cobertura superficial, expresado en tasa anual de disminución del área de bofedal de -0.42 % desde 1990 hasta el 2021.

El área de bofedal de la zona de estudio para el año 2021 es de 551.07 hectáreas, 77.94 ha menos que en el año 1990. La disminución del área de bofedal podría tener su causa en la explotación de pozos de agua subterráneas por parte del Proyecto Especial Tacna (PET) con fines poblacionales y agrícolas.

Entre los factores que estarían causando la disminución del área de bofedal en la comunidad de Ancomarca estarían el pastoreo, extracción de agua y cambio climático; sin embargo, a estos factores aún no se les ha determinado una relación causal (Chambe *et al.*, 2021).

Zorogastúa-Cruz *et al.* (2012) indican que las áreas de los bofedales en la zona de altura de Perú y Bolivia han disminuido por el uso intenso y alteración del régimen hídrico y térmico, lo cual afecta la disponibilidad de agua en las áreas de menor altura cercana a ellos y de áreas estables en la temporada seca.

El incremento anual del área de bofedal observado en el período 2005 – 2021, fue de 28.35 ha (0.33 %). Esto pudo ser debido a la dotación de agua proveniente por desglaciación e incremento de temperatura (Pauca *et al.*, 2020), por causa del cambio climático (Gutiérrez, 2018); que a su vez está determinando la extinción de bofedales que dependen fuertemente de espacio disponible y del agua temporal por precipitación (Zeballos *et al.*, 2014). Los bofedales necesitan para desarrollarse disponibilidad del agua en todo el año (Ruthsatz, 2012).

Los resultados de la investigación evidencian un cambio en los valores del NDVI, en los años 1990, 2005 y 2021. De acuerdo a la clasificación por categorías, el bofedal de Ancomarca se caracteriza por estar constituido por “poca vegetación con baja vigorosidad”, seguido por “poca vegetación con vigorosidad media”. Con el estudio se pudo evidenciar una reducción de los valores del NDVI, que significa que disminuye el vigor de la flora vegetal similar al encontrado en otros estudios (Chambe *et al.*, 2021).

Los valores cada vez menores del NDVI en el proceso de evaluación podría estar relacionada a los cambios de precipitación y temperatura que influyen directamente en la salud del ecosistema de bofedal. Tal como indica Hilari (2010), los regímenes de precipitación y temperatura inciden fuertemente en la vegetación, acelerando los procesos de degradación, especialmente en ecosistemas húmedos y abiertos. Se evidencian cambios a través de los años, desde un incremento aparente del área de los humedales, aumento del NDVI, alteraciones de los patrones de precipitación y tendencias de aumento de temperatura (Pauca, 2021).

Conclusiones

El área del bofedal de la Comunidad de Ancomarca para el año 2021 fue de 551.07 hectáreas, y para el año 1990 de 629.01 hectáreas; observándose una disminución de 77.94 ha en 31 años de evaluación del área de estudio.

La vigorosidad de la vegetación del bofedal fue predominantemente bajo durante los 31 años de evaluación del bofedal, coincidiendo con el menor valor del NDVI. La vigorosidad media a densa se observó en menor porcentaje durante los tres períodos evaluados.

Los valores menores de NDVI coinciden con la baja vigorosidad y los valores mayores con la alta vigorosidad de la vegetación del bofedal. Siendo muy útil el cálculo del índice de vegetación para determinar el estado de salud del ecosistema de bofedales.

La tasa anual de cambio del área de bofedal es de -0.42 % que representa 2.68 hectáreas de pérdida o disminución del área de bofedal por cada año. La pérdida del área podría estar vinculado a la sobreexplotación de aguas subterráneas, sobrepastoreo y al cambio climático.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Lic. Javier Garrido Lecca por ser promotor de la presente investigación en la zona altoandina de Tacna, que a su vez se desarrolló en forma conjunta con las tesis de los autores del presente trabajo.

Referencias

- Campos, A., Guerrero, E., & Gines, E. (2018). Evolución de la cobertura vegetal en el Parque Nacional Cerros de Amotape de Tumbes utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): 2000 – 2014. *Manglar* 15(1): 47-56
- Chambe, J., Quintana, D., & Sanga, M. (2021). Análisis multitemporal de la Laguna Suches y del vigor de la vegetación del Bofedal de Huaytire, Tacna. *Ciencia & Desarrollo*, 20(1), 27-39. <https://doi.org/10.33326/26176033.2021.1.1106>
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección Ambiental*. Barcelona: Editorial Ariel Ciencia.
- Gobierno Regional de Tacna [GORET]. (2016). *Diagnóstico de Diversidad Biológica en la Región Tacna*. Mejoramiento del servicio de monitoreo e información ambiental – GORET, Perú.
- Gutiérrez, Y. (2018). *Determinación de la dinámica espacial de bofedales mediante imágenes satelitales landsat frente a escenarios del cambio climático en la Cuenca del río Coata durante el período de 1984-2016* (tesis de pregrado). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Hilari, V. (2010). *Identificación y análisis multitemporal de cuatro bofedales en el altiplano norte del departamento de La Paz (Ulla Ulla, Ancoraimes, Peñas y Tuní Condoriri)* (tesis de grado). Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.

- Maldonado, M.S. (2014). *Introducción a los bofedales de la región Altoandina Peruana*. Mires and Peat, Volume 15 (2014/15), Article 05, 1-13 (Spanish). <http://www.mires-and-peat.net/>, International Mire Conservation Group and International Peat Society.
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2015). *Mapa Nacional de Cobertura Vegetal*. Ministerio del Ambiente, Lima.
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2019). *Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú. Memoria descriptiva*. Ministerio del Ambiente, Lima.
- Pauca, A., Ramos, C., Luque, C., Talavera, C., Villasante, J., Quispe, J., & Villegas, L. (2020). Análisis espacio temporal y climático del humedal altoandino de Chalhuanca (Perú) durante el periodo 1986-2016. *Revista de Teledetección, Asociación Española de Teldetección* 55, 105-118.
- Pauca, G. (2021). *Dinámica de los humedales altoandinos frente al cambio climático, mediante el uso de imágenes satelitales e información climática, entre los años 1985-2018: Estudio de caso* (tesis de grado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.
- Ruthsatz, B. (2012). Vegetación y ecología de los bofedales altoandinos de Bolivia. *Phytocoenologia*, 42 (3-4), 133 - 179.
- Zeballos, G., Soruco, A., Cusicani, D., Joffré, R., & Rabatel, A. (2014). Uso de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y sistemas de información geográfica para caracterizar la dinámica espacial de glaciares y humedales de alta montaña en Bolivia. *Ecología En Bolivia*, 14-26.
- Zorogastúa-Cruz, P., Quiroz, R., & Garatuza-Payan, J. (2012). Dinámica de los bofedales en el altiplano peruano boliviano. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 8(2): 63-75.